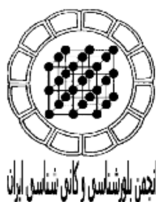
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۹۵، از صفحهٔ ۷۴۳ تا ۷۶۰



کانی شناسی، ژئوشیمی و منشأ سنگ‌های آتشفشانی شمال شرق شهرستان بافت (جنوب کرمان): شاهدی بر ماگماتیسم کمانی در جنوب کمربند ماگمایی ارومیه - دختر

محسن چکنی مقدم *، زهرا طهماسبی، احمد احمدی خلجی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم آباد

(دریافت مقاله: ۹۴/۱۰/۲۶، نسخه نهایی: ۹۵/۳/۲۲)

چکیده: در بخش شمال تا شمال شرق شهرستان بافت، در جنوب کرمان، رخنمون‌های متعددی از سنگ‌های آتشفشانی به‌صورت گسترده وجود دارند که از نظر زمین‌شناسی در بخش شرقی نوار دهج – ساردوئیه که خود بخشی از جزایر قوسی ارومیه-دختر است قرار گرفته‌اند. بیشتر دنباله‌های آتشفشانی شامل آندزیت، آندزیت بازالت، داسیت و به مقدار اندک بازالت و ریولیت به سن ائوسن هستند که همراه با سنگ‌های آذرآواری و پیروکلاستیک شامل گدازه‌ها و روانه‌های ایگنیمبریتی قرار گرفته‌اند. کانی‌های اصلی آن‌ها شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن هستند و از جمله بافت‌های مهم در این واحدهای آتشفشانی می‌توان به انواع هیالوپورفیری میکرولیتیک، پورفیری و جریانی اشاره کرد. درشت بلورهای پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها بافت‌های غیرتعادلی چون منطقه-بندی نوسانی و بافت غربالی را نشان می‌دهند. بررسی‌های ژئوشیمیایی حاکی از این است که سنگ‌های منطقه در قلمرو آهکی قلیایی رده‌بندی می‌شوند. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از نتایج آنالیزها، این سنگ‌ها از نظر LREE نسبت به HREE غنی‌شدگی از خود نشان می‌دهند و نیز بالا بودن مقدار عناصر ناسازگار LILE نسبت به HFSE و مشاهده‌ی بی‌هنجاری منفی در عناصری مثل Ti، Nb و P در گدازه‌ها، حاکی از یک محیط زمین‌ساختی فرورانشی است و مبین آن است که ماگمای مادر تشکیل دهنده احتمالاً از ذوب بخشی گوه گوشته‌ای که خود در تماس با جریان‌های مشتق شده از پوسته‌ی اقیانوسی فرورونده بوده و از عناصر کمیاب سبک (LREEها) غنی شده، ریشه گرفته است.

واژه‌های کلیدی: *بافت پورفیری؛ دنباله‌ی آندزیتی؛ غنی شدگی LREE؛ قوس آتشفشانی؛ جنوب کرمان؛ کمربند ارومیه-دختر.*

مقدمه

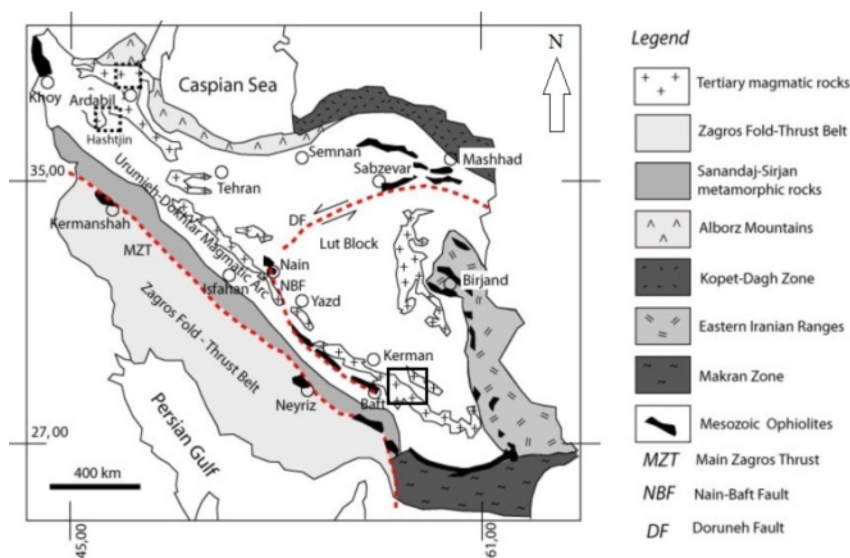
بدون شک چشمگیرترین فعالیت‌های آتشفشانی سرزمین ایران در زمان ائوسن به رخ داده است و آثار آن را می‌توان در تمام نقاط این سرزمین جز کپه داغ و زاگرس مشاهده کرد [۱]. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن دارای تنوع ترکیبی زیادی از اسیدی تا بازی بوده و اغلب به سری آهکی-قلیایی تعلق دارند. در این میان به سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌های البرز و ارومیه-دختر بیشتر توجه شده است و هر چند منطقه‌ی مورد بررسی به این نواحی تعلق دارد ولی بررسی‌های دقیقی نیز تاکنون روی آنها صورت نگرفته است لذا بررسی دقیق آن ضروری به نظر می‌رسد. منطقه‌ی مورد نظر در جنوب کرمان قرار گرفته و گستره‌ای به طول چندین کیلومتر را پوشش داده است و بخشی از کمربند ماگمایی ارومیه دختر است [۲] که در استان کرمان با عنوان دهج – ساردوئیه نامیده می‌شود و سن سنگ-های آذرین آنها را منطبق بر شواهد چینه شناسی و روابط صحرایی به‌طور کلی ائوسن و پسا ائوسن می‌دانند [۳] (شکل ۱).

این منطقه از نظر مختصات جغرافیایی بین طول‌های ۴۵´ °۵۶ تا ۰۰´ °۵۷ درجه شرقی و عرض‌های ۱۵´ °۲۹ تا ۳۰´ °۲۹ درجه شمالی واقع شده است (شکل ۲). از جمله اولین بررسی‌های سازمانی و اولیه در این منطقه را می‌توان به

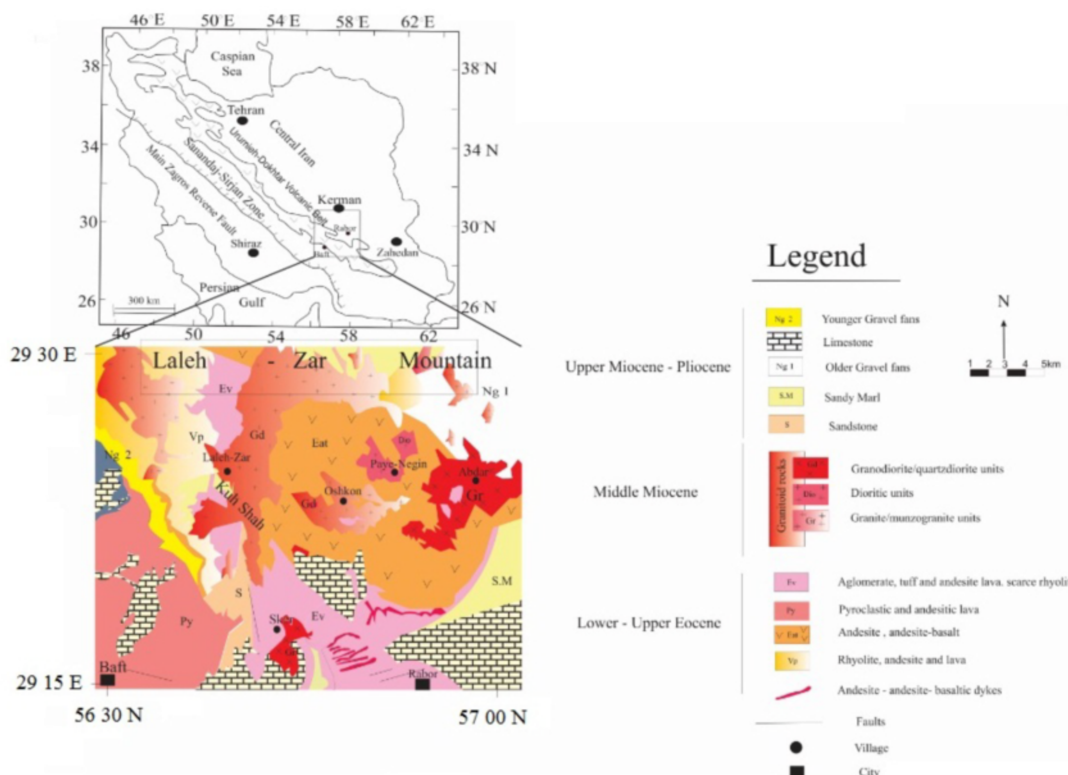
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۶۹۰۳۰۹۳، پست الکترونیکی: Chekanimoghadam.m@lu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

کارهای نقشه برداران یوگسلاوی [۴] در جهت تهیه نقشه‌ی زمین شناسی استان کرمان و از نظر بررسی‌های سنگ‌شناسی انجام شده به بررسی‌های [۶،۵] اشاره کرد که به بررسی سنگ-های آتشفشانی جنوب غرب بردسیر و جنوب شرق آن پرداخته‌اند و طیف گسترده‌ای از سنگ‌های آتشفشانی منطقه را مورد بررسی قرار داده‌اند. این واحدهای آتشفشانی با حجم عظیمی از توده‌های نفوذی جوان‌تر قطع شده‌اند (شکل۲). در این پژوهش سعی بر آن است که ضمن بررسی سرشتی‌های میکروسکوپی و صحرایی سنگ‌ها، خصوصیات ژئوشیمیایی آنها نیز مورد بررسی قرار گیرد و جایگاه زمین‌شناسی آنها نیز مورد بحث و بررسی شود.



شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی مورد نظر روی نقشه‌ی تفکیک کننده منطقه‌های ساختاری ایران (اقتباس از [۷]).



شکل ۲ تصویر نشان دهنده‌ی گستره‌ی مورد بررسی روی نقشه‌ی زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بافت [۸].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

روش بررسی

برای رسیدن به اهداف این بررسی، پس از بازدیدهای میدانی و نمونه برداری‌های مختلف، ۱۰۰ مقطع نازک از سنگ‌های آتشفشانی متنوع منطقه تهیه شدند. در این میان نمونه‌های دگرسان شده و نادگرسان از هم تفکیک شده و تعداد ۱۰ نمونه سالم برای تجزیه شیمی سنگ‌کل به آزمایشگاه ACME Lab. کانادا ارسال شدند. تجزیه‌های شیمیایی عناصر اصلی به روش ICP-AES و برای عناصر نادر و فرعی به روش ICP-MS انجام گرفته است (جدول ۱).

جدول ۱ نتایج آنالیزهای شیمیایی انجام شده به روش ICP-MS از سنگ‌های آتشفشانی منطقه شمال شرق بافت.

شماره نمونه	AB58	AB62	AB141	AB149	ES20	ES49	ES76	DE1	DE2	AB 18
نام سنگ	**آندزیت**	**آندزیت**	**داسیت**	**داسیت**	**بازالت**	**آندزیت**	**آندزی‌بازالت**	**آندزی‌بازالت**	**آندزی‌بازالت**	**آندزیت**
SiO_2 (wt%)	۶۱/۵	۶۰/۹	۶۷/۱۱	۶۶/۷۶	۴۸/۳۲	۵۷/۸۱	۵۴/۲۴	۵۵/۸۴	۵۵/۹۲	۵۶/۵۱
TiO_2	۰/۵۶	۰/۶۱	۰/۴	۰/۴۱	۰/۷۷	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۵۶
Al_2O_3	۱۷/۷۴	۱۷/۴۸	۱۶/۱۶	۱۶/۳۶	۱۶/۸۷	۱۸/۵۱	۱۸/۳۷	۱۸/۰۵	۱۸/۱۸	۱۸/۱۷
Fe_2O_3	۵/۰۹	۵/۳۳	۲/۸۸	۲/۹۶	۱۰/۲۴	۸/۲۳	۷/۹۲	۷/۲۸	۶/۰۸	۷/۴۷
MgO	۲/۱۰	۲/۳۰	۱/۰۸	۱/۰۶	۴/۵۸	۳/۳۹	۱/۹۶	۲/۴۸	۲/۵۱	۳/۹۲
CaO	۵/۶۵	۵/۶۰	۳/۸۲	۳/۹۶	۱۰/۳۱	۷/۷۱	۶/۴۶	۷/۰۶	۷/۳۷	۶/۴۱
MnO	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۴
Na_2O	۳/۸۷	۳/۸۳	۴/۳۱	۴/۳۲	۲/۲۱	۳/۲۵	۴/۲۱	۳/۰۸	۳/۰۷	۳/۲۴
K_2O	۲/۴۲	۲/۳۹	۱/۹۴	۱/۸۸	۳/۱۶	۰/۷۶	۱/۲۴	۱/۷۴	۱/۷۳	۲/۴۴
P_2O_5	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۰
Al_2O_3/Fe_2O_3	۳/۵۴	۳/۲۸	۵/۶۱	۵/۵۲	۱/۶۵	۲/۲۵	۲/۳۲	۲/۴۸	۳/۳۰	۲/۴۴
Sc	۱۰	۱۱	۴	۴	۱۶	۱۷	۲۰	۱۹	۲۱	۱۹
L.O.I	۱/۲	۱/۶	۱/۵	۱/۴	۱/۶	۲/۲	۱	۳/۳	۳/۲	۲/۰
Total	۹۹/۸۱	۹۹/۸۲	۸۹/۹۹	۹۹/۷۴	۹۹/۸۸	۹۹/۷۶	۹۹/۷۶	۹۹/۸۰	۹۹/۸۱	۹۹/۸۳
Ba (ppm)	۳۸۴	۳۹۲	۵۱۱	۵۲۲	۱۴۶	۳۵۰	۶۳	۳۰۳	۳۱۴	۱۷۱
Co	۱۳/۸	۱۶	۵/۷	۷/۳	۲۰/۸	۱۳	۳۳	۲۰/۳	۲۰	۱۹
Cs	۴	۳/۹	۴/۱	۴/۲	۲/۵	۱۲/۲	۱	۲/۷	۲/۸	۱/۱۲
Hf	۲/۶	۲/۶	۲/۹	۲.۸	۱/۷	۵/۵	۱	۲/۹	۳/۳	۱/۸
Nb	۴/۲۰	۴/۸	۳/۷	۴	۱/۵	۶	۰/۵	۳/۶	۳/۵	۲/۳۱
Rb	۴۸/۵۰	۵۲/۴	۵۷/۲	۵۸	۲۲/۱	۱۴/۷	۰/۴	۵۰	۴۹/۵	۳۶/۵۱
Sr	۶۰۲	۵۹۱	۵۷۵	۵۷۳	۴۵۰	۲۹۷	۴۸۶	۴۲۴	۴۲۵	۴۰۲/۵
Ta	۰/۲۰	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲۰
Th	۶	۶/۵	۴/۲	۴/۶	۱/۴	۱۲/۸۰	۰/۴	۵/۲۰	۵/۱۰	۲/۶
U	۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۵	۱/۳	۰/۵	۳/۲	۰/۱	۰/۸	۰/۸	۰/۶۰
V	۱۱۴	۱۱۸	۶۶	۶۸	۱۸۰	۱۰۸	۲۵۷	۱۹۴	۱۶۵	۱۷۰
Zr	۹۵	۹۲	۱۰۶/۷	۱۰۵/۸	۶۳	۱۸۸	۲۸/۶۰	۱۱۶	۱۱۳	۶۷/۳
Y	۸/۲۰	۸/۴	۴/۴	۵	۱۶	۲۲/۵۰	۱۲/۵۰	۲۰	۲۰	۱۳/۰۰
La	۱۹/۲۰	۱۹/۴۱	۱۸/۷	۱۸/۷	۷/۲۰	۲۰	۳/۷۰	۱۳	۱۳/۷	۱۰/۴۳
Ce	۳۰/۲۱	۳۴	۳۳/۷	۳۴	۱۵/۱۰	۴۰/۹۰	۷/۶۰	۲۶	۲۶/۸۰	۱۷/۹
Pr	۳/۷۴	۳/۹۴	۳/۹۶	۳/۹۱	۲/۰۰	۴/۹۰	۱/۱۴	۲/۳۷	۳/۵۴	۲/۳۴
Nd	۱۲/۷۱	۱۴/۵	۱۴/۹	۱۵	۹۰/۸	۱۹/۷۱	۵/۶	۱۴	۱۵	۹/۰
Sm	۲/۴۴	۲/۵۶	۲/۴۷	۲/۲۶	۴۲/۲	۴/۱۶	۱/۷۲	۳/۱۹	۳/۳۶	۱/۸۱
Eu	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۸۳	۰/۹۲	۰/۶۸	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۶۶
Gd	۱/۹۰	۲/۱۸	۱/۶۳	۱/۵۷	۲/۶۷	۴/۲۹	۲/۰۳	۳/۵۵	۳/۷۸	۲/۱۱
Tb	۰/۲۸	۰/۳	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۴۵	۰/۷۱	۰/۳۸	۰/۶	۰/۶۴	۰/۳۵
Dy	۱/۴۸	۱/۶۲	۰/۸۶	۰/۸۵	۲/۸۴	۴/۰۳	۲/۲۵	۳/۳۳	۳/۶۰	۲/۰۷
Ho	۰/۴۸	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۴۲
Er	۰/۷۴	۰/۶۲	۰/۳۴	۰/۳۸	۱/۳۵	۲/۲۵	۱/۷۰	۲/۳۰	۲/۰۵	۱/۱۵
Tm	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۴۰	۰/۰۵	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۱۸
Yb	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۳۴	۰/۲۵	۱/۷۴	۲/۳۳	۱/۳۳	۱/۸۸	۲/۲۲	۱/۳۴
Lu	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۲	۰/۳۱	۰/۳۶	۰/۲۲
Nb/Y	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۸۴	۰/۸	۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۷
Nb/U	۲/۶۳	۲/۹۸	۲/۴۷	۳/۰۷	۳	۱/۸۸	۵	۴/۵	۴/۴	۳/۸۵
Nb/Th	۰/۷	۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۸۷	۱/۲	۰/۴۵	۰/۸	۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۸۸
Th/La	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۶۴	۰/۱	۰/۴	۰/۳۷	۰/۲۵
Ba/Nb	۸۲	۹۱	۱۳۰	۱۳۸	۹۷	۵۹	۱۲۶	۷۵	۷۸	۷۴
La/Sm	۷/۸۶	۷/۵۷	۷/۵۷	۸/۲۷	۰/۱۷	۴/۸	۲/۱۶	۴/۰۷	۴/۰۷	۵/۸
Zr/Y	۱۱/۵۸	۱۰/۹۵	۲۴	۲۱	۳/۹۳	۸/۵۴	۲/۳۸	۵/۸	۵/۶۵	۵/۱۷
Zr/Nb	۲۲/۷	۱۹/۱	۲۸/۶	۲۶/۲۵	۴۲	۳۱/۳	۵۷/۲	۳۲/۲	۳۲/۲	۲۹/۱
Ce/Yb	۴۵	۴۴	۹۹	۱۳۶	۹	۱۸	۶	۱۴	۱۲	۱۵
La//Yb	۲۹	۲۵/۵	۵۵	۷۵/۵	۵	۸	۳	۷	۶/۱۷	۸
Eu/Eu*	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۲	۱/۱۲	۱/۲	۱/۰۰	۰/۸۵	۰/۷۵	۱/۰۳

ویژگی‌های سنگ‌شناسی واحدهای منطقه

منطقه‌ی مورد بررسی را سنگ‌های آتشفشانی، مواد آذرآواری و توده‌های نفوذی نیمه عمیق تشکیل داده‌اند. چینه‌شناسی منطقه مورد بررسی از قدیم به جدید شامل جریان‌های گدازه‌ی آندزیتی، آندزیت بازالت و پیروکلاستیک‌ها می‌شوند که به ترتیب از ائوسن‌زیرین تا فوقانی سن آن‌ها تعیین شده‌اند [۹] و در بخش شمال و غرب منطقه به فراوانی گسترش یافته‌اند. توده‌های متعدد نفوذی از جنس گرانودیوریت، کوارتزدیوریت و مونزوگرانیت به همراه دیوریت‌ها نیز رخنمون دارند که برای آن‌ها سن میوسن و الیگوسن را در نظر گرفته‌اند [۱۰] و همه‌ی آنها قطع کننده‌ی واحدهای آتشفشانی هستند. از واحدهای اصلی آتشفشانی شامل آندزیت، آندزیت- بازالت، داسیت و به مقدار کمتر بازالت و ریولیت تشکیل شده‌اند و مجموعه‌های رسوبی با گسترش زیاد شامل ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومرا این واحدهای آتشفشانی را پوشانده‌اند.

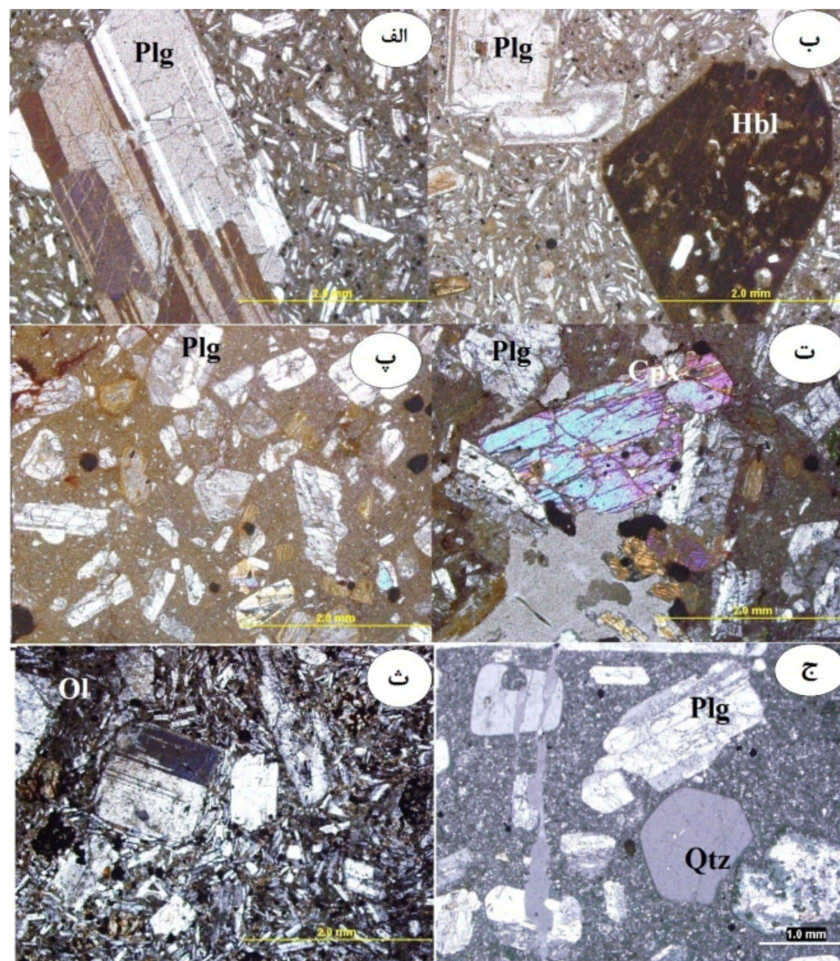
آندزیت‌ها

آندزیت‌ها فراوان‌ترین خانواده از سنگ‌های آتشفشانی منطقه بوده و به صورت مزوکرات دیده می‌شوند و رنگ‌های خاکستری و سبز روشن مشاهده می‌شوند. بافت غالب در آن‌ها پورفیری با خمیره ریزدانه تا شیشه‌ای بوده و برخی از آن‌ها بافت‌های جریانی را از خود دارند. آندزیت‌ها حاوی بلورهای درشت پلاژیوکلاز با طول حداکثر ۲ میلی‌متر هستند. پلاژیوکلازها فراوانی بالایی داشته و به رنگ‌های سفید شکل‌دار و نیمه شکل‌دار با منطقه‌بندی نوسانی مشاهده می‌شوند و بافت پورفیری را در این سنگ‌ها شکل داده‌اند (شکل ۳ الف). درشت بلورهای نیمه‌شکل‌دار و شکل‌دار هورنبلند سبز همراه با پیروکسن‌ها از فراوانترین کانی‌های فرومنیزین در این واحدها هستند. هورنبلندها در حدود ۱۰درصد حجمی آندزیت‌ها را تشکیل می‌دهند و آثار تحلیل یافتگی و سوختگی هم نیز در آنها مشاهده می‌شوند (شکل ۳ ب). این حالت سوختگی به دلیل غلبه اکسیژن و حالت اکسایش است که به دلیل عدم تعادل این کانی در محیطهای آبدار و با دمای بالاست که به این حالت اصطلاحاً سوختگی آمفیبول اطلاق شده است [۱۱]. خمیره‌ی ریز دانه، بیشتر از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز در آندزیت‌ها و در تراکی‌آندزیت‌ها از پلاژیوکلاز و فلدسپات پتاسیم تشکیل یافته است. پیروکسن‌ها در نمونه‌های سنگی با رنگ تیره خود دیده می‌شوند و فراوانی کمتری نسبت به پلاژیوکلازها دارند. در برخی از پیروکسن‌ها نفوذی‌هایی از کهنسنگ‌های پلاژیوکلاز وجود دارند (شکل ۳ ب). پیروکسن‌ها با توجه به زاویه‌ی خاموشی از نوع اوژیت تشخیص داده شده‌اند و گاهی در اثر گرماب‌ها به کانی‌های تیره مثل اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند.

آندزیت بازالت‌ها

این نوع سنگ‌ها که بیشتر به صورت دایک در یک منطقه‌ی کوچک در منطقه رخنمون یافته‌اند که در نمونه‌ی دستی به رنگ قهوه‌ای مایل به سیاه دیده می‌شوند و بافت آنها پورفیری و جریانی است. در مقطع میکروسکوپی این سنگ‌ها می‌توان کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن و هورنبلند و کانی‌های فرعی و ثانویه مثل کانی‌های تیره، اپیدوت و کلریت را مشاهده کرد. پلاژیوکلاز در این قبیل سنگ‌ها بصورت انواع شکل‌دار و نیمه شکل‌دار قابل تشخیص‌اند (شکل۳ پ). این کانی در این دایک-ها دارای رد پلی‌سنتتیک و بافت غربالی است و در برخی موارد به خوبی تجزیه آن به سریسیت مشاهده می‌شود. پیروکسن نیز از دیگر کانی‌های مهم این قبیل سنگ‌هاست که معمولاً به صورت درشت‌دانه در متن سنگ مشاهده می‌شوند. پیروکسن با درصد حجمی تقریبی تا ۱۰ درصد بصورت شکل‌دار و نیمه شکل‌دار از نوع کلینوپیروکسن است و در اندازه‌هایی در حدود ۲ میلی‌متر دیده می‌شوند. پیروکسن‌ها در برخی مقاطع دگرسان و تبدیل به کانی‌های اپیدوت، کلریت و کانی‌های تیره شده‌اند (شکل ۳ ت). هورنبلند با حجم تقریبی تا ۱۰ درصد نیز از دیگر کانی‌های مهم شناسایی شده در این سنگ‌هاست. در برخی از مناطق بلورهای سوزنی یا میله شکل هورنبلند به راحتی قابل تشخیص‌اند. این کانی در برخی از مقاطع آثاری از دگرسانی به کانی‌های ثانویه را از خود نشان می‌دهد. کانی‌های کدر با فراوانی تا ۵ درصد حجمی فراوانترین و مهم‌ترین کانی فرعی هستند. این بلورها بیشتر به حالت نیمه شکل‌دار بوده و با اندازه‌ای متوسط فضای بین زمینه‌ی سنگ را پر کرده‌اند. این کانی‌ها نیز به صورت ثانویه پیرامون کانی‌های بیوتیت و هورنبلند را پر کرده‌اند. در آندزیت بازالت‌ها بلورهای پلاژیوکلاز دارای بافت غربالی بوده و منطقه‌بندی از خود نشان می‌دهند که نشانگر عدم تعادل شیمیایی بین بلورها و گدازه است [۱۱]. منطقه بندی در این کانی‌ها به برقرار نبودن تعادل کامل در خلال تبلور وابسته است که این فرایند عدم تعادل به خوبی در کانی پلاژیوکلاز به ثبت می‌رسد [۱۱]. از طرفی وجود منطقه-بندی در بلورها را می‌توان نشانه‌ای از اختلاط ماگماهایی دانست که ترکیب متفاوت دارند [۱۳،۱۲].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]



شکل ۳ تصاویر مختلف از مقاطع نازک سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد بررسی: الف) تصویری نشانگر بافت تراکیتی در سنگ‌های تراکی‌آندزیتی منطقه که در آن فنوکریست پلاژیوکلاز کاملاً مشهود است (XPL)، ب) تصویری از یک درشت بلور هورنبلند در یک آندزیت که در مرکز آن بلورهای ریز پلاژیوکلاز به صورت نفوذی مشاهده می‌شوند (XPL)، پ) تصویری از یک مقطع آندزیت-بازالتی که در آن کلینوپیروکسن و پلاپوکلاز مشخص شده است (XPL)، ت) تصویری از یک مقطع آندزیت-بازالتی که در آن بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن دیده می شوند (XPL)، ث) تصویر یک مقطع بازالتی و تجزیه الیوین به ایدنگسیت که در بالای تصویر سمت چپ قرار گرفته است (XPL)، ج) تصویری از طرح خلیجی کوارتز در یک سنگ داسیتی در منطقه‌ی (XPL).

بازالت‌ها

بازالت‌ها در منطقه‌ی شمال شرق بافت و در ناحیه‌ی مورد بررسی کمترین تنوع سنگ‌ها را به خود اختصاص داده‌اند و همراه با دنباله‌های آندزیت-بازالتی دیده شده‌اند. در نمونه‌ی دستی، این سنگ‌ها به رنگ‌های خاکستری تیره و سیاه و اغلب بدون حفره مشاهده شده‌اند. در نمونه دستی الیوین‌ها به رنگ سرخ دیده می‌شوند که نشانه‌ای از ایدنگسیتی شدن آنهاست. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها را می‌توان پلاژیوکلاز و پیروکسن و الیوین قلمداد کرد که الیوین‌ها به دلیل دگرسانی به ایدنگسیت تبدیل شده‌اند و شناسایی آنها دشوار شده است. بر پایه بررسی-های میکروسکوپی، سنگ‌های بازالتی بیشتر آفانیتیک و دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن هستند که در رده‌بندی بافتی، بافت‌های میکرولیتی پورفیریک را نشان می‌دهند (شکل۳ ث). بافت گلومروپورفیریک که ناشی از پدیده تفریق ماگمایی است در این دنباله‌ها مشاهده شده است. پلاژیوکلازها هم به صورت درشت بلور و هم کشیده و میله‌ای شکل بیشتر متن سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. پیروکسن‌ها نیز با اندازه‌ای متوسط در حدود ۱ میلی متر پس از پلاژیوکلاز مهمترین کانی تشکیل دهنده این سنگ‌ها هستند که در برخی

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

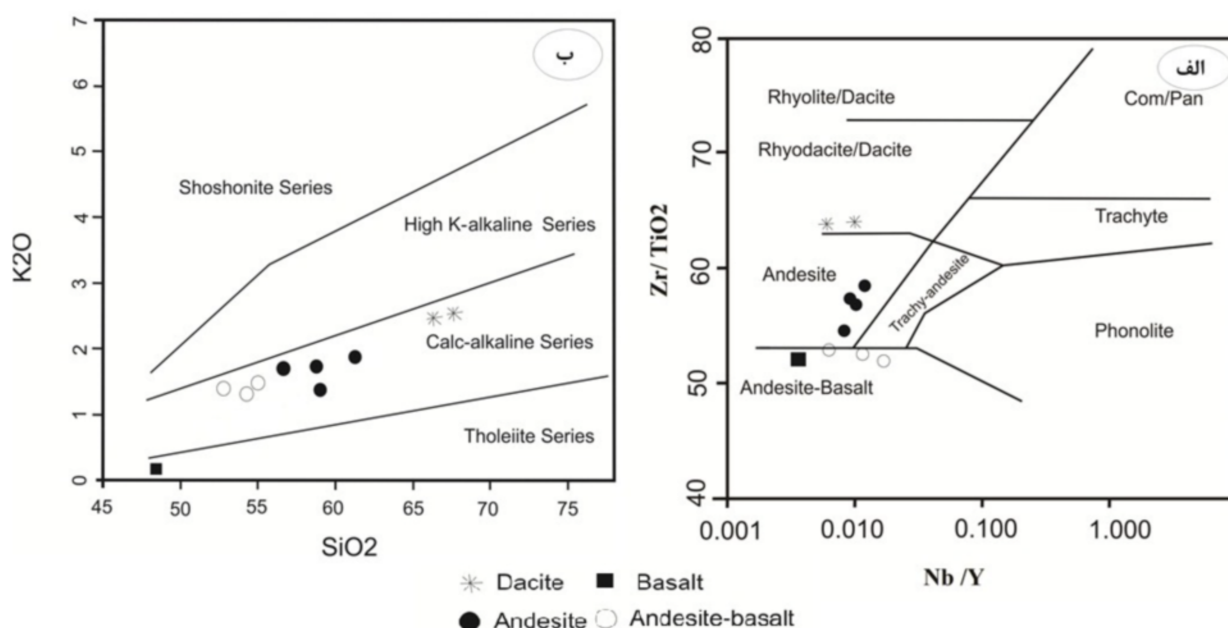
از مقاطع آثار تجزیه شدن آنها به کانی‌های تیره از جمله مگنتیت مشاهده شده‌اند (شکل۳ ث).

داسیت‌ها

داسیت‌ها در منطقه‌ی مورد بررسی با ظاهری خاکستری در نمونه‌ی دستی مشخص و متمایز هستند. بافت اصلی آن‌ها هم پورفیری با خمیره‌ی دانه ریز و گاهی بافت پوئی‌کلیتیک است. درشت بلورهای شکل‌دار و دارای منطقه‌بندی نوسانی پلاژیوکلازها، فراوانترین تشکیل دهندگان این واحدها هستند و برخی از آن‌ها کرانه‌های خلیجی شکل دارند (شکل ۳ ج). مهمترین کانی فرومنیزین در این سنگ‌ها درشت بلورهای هورنبلند سبز با حاشیه‌های واکنشی و گاهی بیوتیت‌ها هستند. کوارتز کمتر از ۲۰ درصد حجم این سنگ‌ها را بخود اختصاص داده است و به صورت بلورهای بی شکل هم بعد با اندازه‌های ۰/۵ تا ۲ میلی متر دیده می‌شوند. کانی‌های تیره آب‌دار همانند بیوتیت و هورنبلند نیز تا کمتر از ۱۰ درصد حجمی این سنگ‌ها را تشکیل داده‌اند و به شکل میکروفنوکریست و بلورهای ریز در متن سنگ حضور دارند. کانی‌های فرعی هم کمتر از ۵ درصد حجمی این سنگ‌ها را تشکیل داده‌اند که کانی‌های تیره مهمترین آنها هستند. این کانی‌ها بیشتر به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و به صورت منفرد در فضای بین پلاژیوکلازها قرار گرفته‌اند.

ژئوشیمی و سنگ زایی

در نمودار نامگذاری Zr/TiO_2 نسبت به Nb/Y [۱۴] (شکل ۴ الف) نمونه‌های سنگی منطقه در گستره آندزیت تا آندزیت بازالت، تراکی‌آندزیت و داسیت قرار می‌گیرند. همچنین در نمودار تعیین سری ماگمایی با استفاده از مقدار K_2O نسبت به SiO_2 [۱۵] (شکل۴ ب) نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی آهکی-قلیایی با پتاسیم متوسط قرار می‌گیرند. از سرشتی‌های مهم سنگ‌های آتشفشانی وابسته به جزایر قوسی، روند خطی و پیوسته‌ی مثبت در نمودار K_2O-SiO_2 است در حالی که در سنگ‌های آتشفشانی که در حواشی فعال قاره قرار دارند داده‌ها کمی پراکندگی دارند که این مورد در سنگ‌های تحت بررسی در منطقه شمال غرب بافت نیز مشاهده شده است که می‌توان یکی از احتمالات آن را به آغشتگی ماگمای مادر با مواد پوسته‌ای ربط داد [۱۱]. سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی بافت در استان کرمان با مقدار اکسید سیلیس برابر ۴۸/۳۲ تا ۶۱/۵۰ درصد وزنی مشخص شده‌اند. میزان Al_2O_3 و K_2O این گدازه‌ها نیز در حد متوسط بوده و مقادیر به ترتیب ۱۶/۱۶ تا ۱۸/۵۱ و ۰/۷۶ تا ۲/۴ درصد وزنی را نشان می‌دهند.

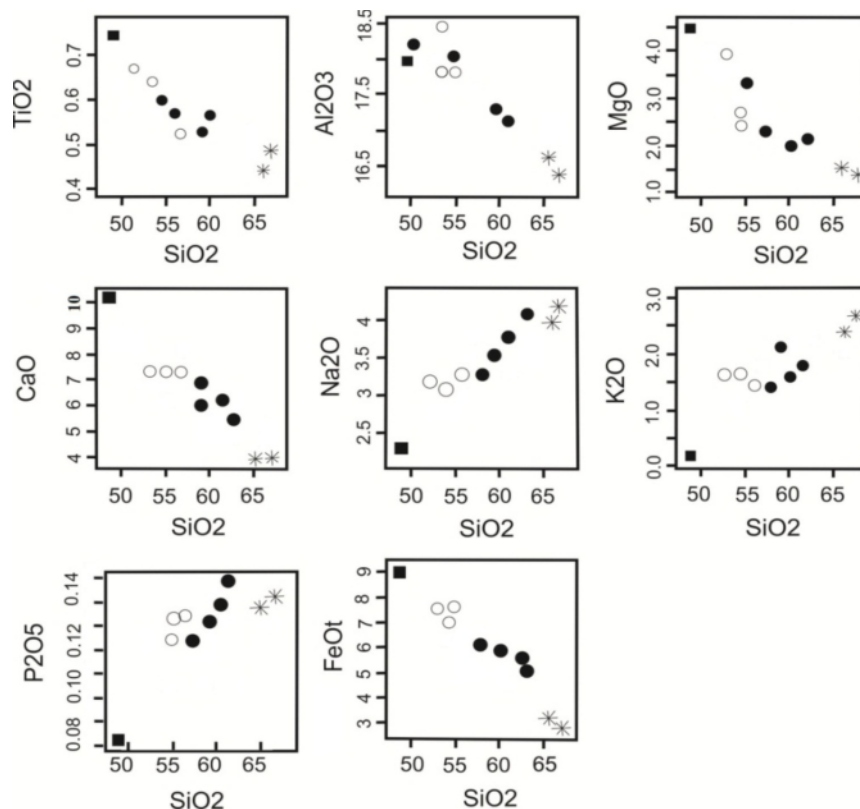


شکل ۴ الف) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی شمال شرق بافت در نمودار نامگذاری Zr/TiO_2 نسبت به Nb/Y [۱۴]، ب) تعیین سری ماگمایی گدازه‌های منطقه‌ی مورد بررسی با استفاده از نمودار K_2O نسبت به SiO_2 [۱۵].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

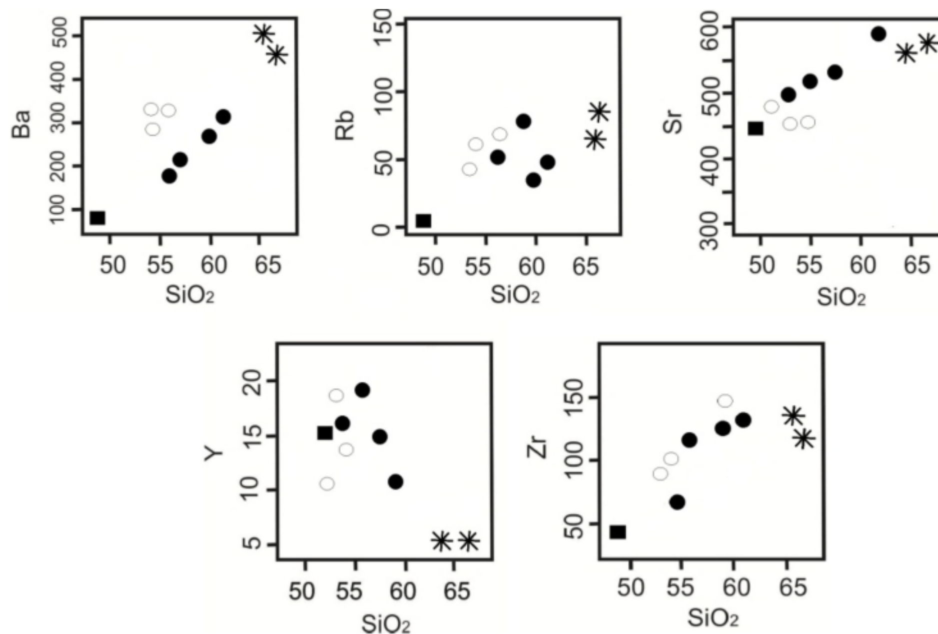
بررسی روند تغییرات در نمودارهای هارکر، نشان می‌دهد که با افزایش سیلیس اکسیدهای عناصر اصلی مانند Al_2O_3، CaO و Fe_2O_3 روندی نزولی و عناصری مانند Na_2O، K_2O و P_2O_5 روندی صعودی مشخصی را نشان می‌دهند (شکل ۵). در نمودارهای هارکر روند عناصر فرعی و کمیاب مانند Ba، Zr و Rb صعودی است و این روندها برای عناصری از قبیل Sr و Y نزولی است (شکل ۶). روندهای نزولی مشاهده شده در بعضی از این نمودارها (مانند نمودارهای CaO، Al_2O_3 و Fe_2O_3) می‌تواند به علت تبلور پلاژیوکلاز کلسیک و کلینوپیروکسن باشد [۱۶].

روندهای افزایشی مشاهده شده را در برخی نمودارها (مانند K_2O و P_2O_5) را می‌توان به این علت نسبت داد که این اکسیدها در مراحل اولیه جدایش به صورت ناسازگار عمل کرده و میل به باقی ماندن در فاز گدازه را از خود نشان داده‌اند و با بیشتر شدن روند تکامل ماگما وارد کانی‌های با دمای پایین می‌شوند [۱۷]. عدم تشکیل آپاتیت در مراحل اولیه تکامل ماگما سبب انباشت فاز فسفر در ماگما و بیشتر شدن تمرکز P_2O_5در ماگمای اولیه می‌شود. زمانی‌که ماگماها فرآیندهای تبلور بخشی را بدون تحمل آلایش پوسته‌ای سپری می‌کنند داده‌های مربوط به تجزیه‌های شیمیایی آنها در نمودارهای هارکر یک روند خطی پیوسته را نشان می‌دهد. در شکل ۵ این روندهای خطی در مورد سنگ‌های آتشفشانی منطقه شمال غرب بافت دیده می‌شود که تقریبا روندی منظم دارند [۱۱]. در شکل ۷ که نمونه‌های سنگی منطقه نسبت به گوشته‌ی اولیه بهنجار شده‌اند [۱۸]، عناصر Nb، Ti و بی‌هنجاری‌های منفی نشان می‌دهند در حالی که Rb، K، Sr و Th غنی‌شدگی نسبی دارند. بی‌هنجاری منفی Ti و Nb همراه با غنی شدگی LREE و بی‌هنجاری مثبت K می‌تواند نشان دهنده‌ی یک محیط قوس قاره‌ای وابسته به فرورانش باشد [۱۹] مقدار بالای LILE (Rb، K، Ba، Sr، Pb و U) نسبت به HFSE (Nb، Zr و Hf) و بی‌هنجاری منفی Ta، Nb و Ti در آندزیت‌ها از ویژگی‌های گدازه‌های آندزیتی آهکی - قلیایی در حاشیه‌های قاره‌ای همگراست. چنین روندهایی توسط تعدادی از پژوهشگران در مجموعه آتشفشانی‌های آهکی-قلیایی آرکئن پسین در منطقه‌ی سازندهای کورنالپی و گیندالبی در غرب استرالیا گزارش شده است [۲۰].

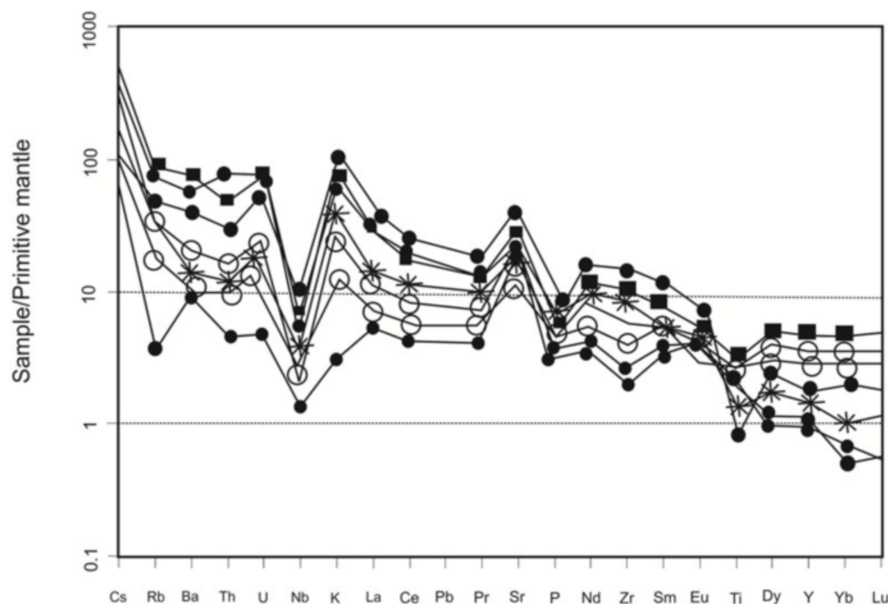


شکل ۵ تغییرات اکسیدهای اصلی در برابر درصد وزنی SiO_2 برای نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی (علائم مشابه شکل ۴).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]



شکل ۶ تغییرات عناصر کمیاب و عناصر فرعی در برابر درصد وزنی SiO_2 (علائم مشابه شکل ۴).



شکل ۷ نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته‌ی اولیه [۱۸] برای نمونه‌های برداشت شده از منطقه‌ی شمال شرق بافت (علائم مشابه شکل ۴).

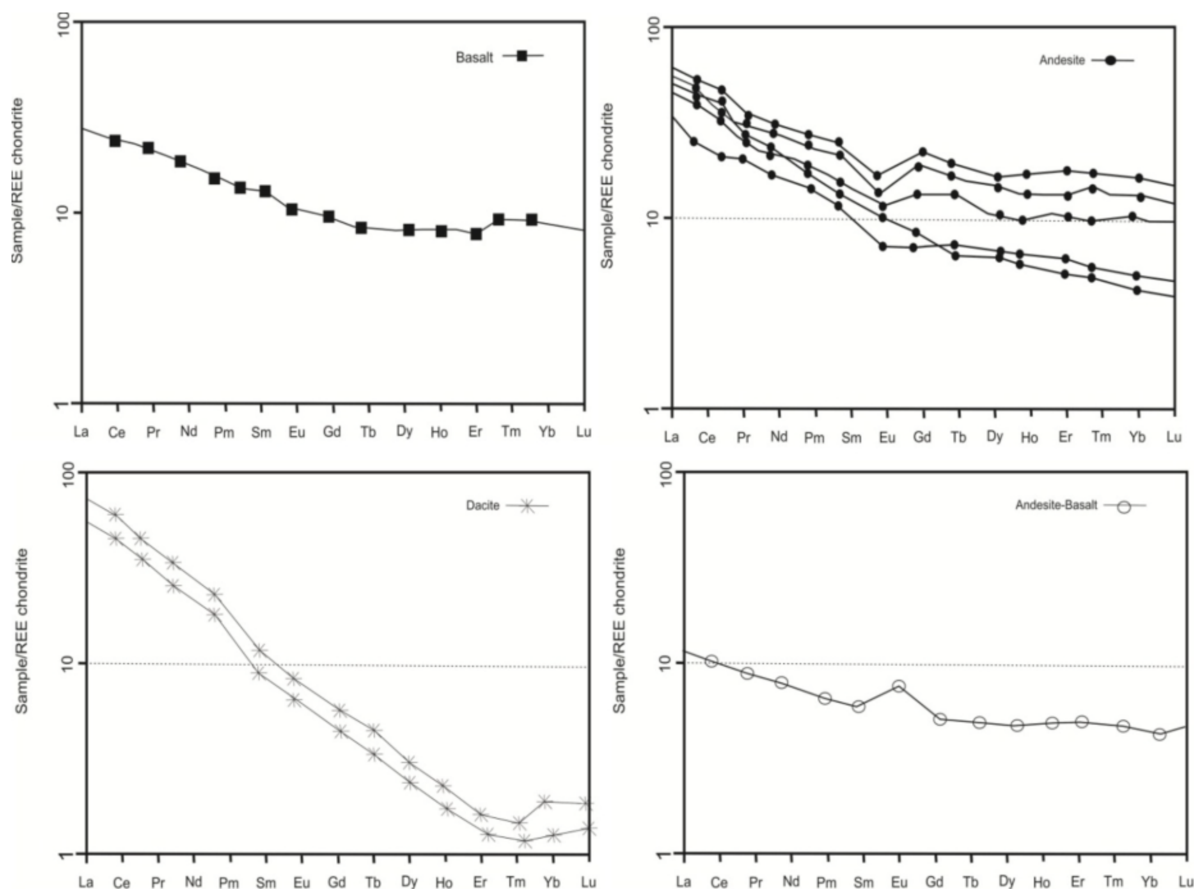
در شکل ۸ که الگوی عناصر خاکی نادر به هنجار شده نسبت به کندریت [۱۹] نشان داده شده است نمونه‌های سنگی منطقه به تفکیک نشان داده شده‌اند.

همخوان با این نمودار، مشاهده می‌شود که هر ۴ طیف سنگی بررسی شده در منطقه، روندهای خاصی را نشان می‌دهند. واحدهای بازالتی و آندزیت بازالتی منطقه یک الگوی تقریباً مشابه یکنواخت و مسطح را نشان می‌دهند با این تفاوت که در آندزیت-بازالت‌ها غنی‌شدگی از Eu مشاهده می‌شود که علت آن را می‌توان به عدم تبلور پلاژیوکلاز در مراحل اولیه تبلور ماگما و انباشت Eu در فاز گدازه نسبت داد. در مقابل در واحدهای آندزیتی تهی‌شدگی از Eu مشاهده می‌شود که با مشاهده‌ی فراوان درشت بلورهای پلاژیوکلاز در مقاطع مشاهده

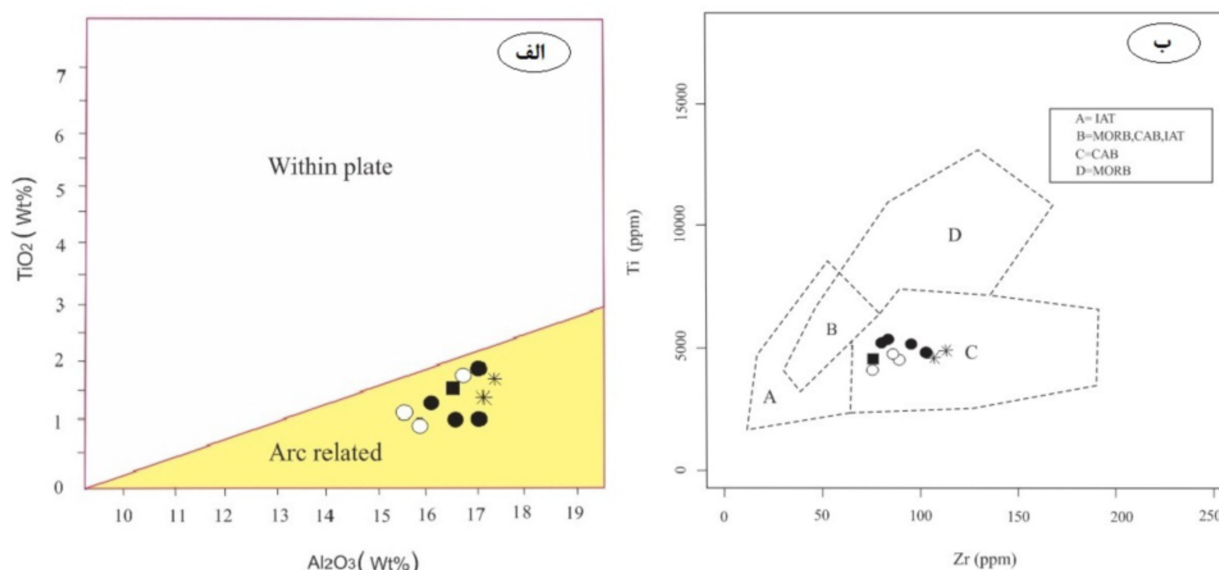
شده کاملاً سازگار و منطبق است. در تمام واحدها غنی شدگی LREE نسبت به HREE مشاهد شده است. سنگ‌های داسیتی منطقه نیز الگوی غنی شدگی عناصر LREE نسبت به MREEها و HREE ها را نشان می‌دهند. تهی شدگی عناصر MREE در این نوع سنگ‌های منطقه را می‌توان با تبلور هورنبلند در این سنگ‌ها توجیه کرد که مهمترین حامل برای این عناصر تلقی می‌شود. در این نمودار عنصر Eu نسبت به عناصر پیرامون بیهنجاری منفی نشان می‌دهد (برای آندزیت-های منطقه نسبت *Eu/Eu برابر با ۰٫۸۶ و برای آندزیت-بازالت‌ها نسبت آن ۱٫۰۴ است). در نمودار TiO_2-Al_2O_3 [۲۱] (شکل۹ الف) نمونه‌های منطقه در گستره‌ی قوس ماگمایی ناشی از فرورانش قرار می‌گیرند. با ترسیم داده‌های نمونه‌های مورد بررسی در نمودار تمایزی [۲۲] مشخص شده است که نمونه‌های مورد بررسی در قلمرو سنگ‌های وابسته به محیط-های فرورانش قرار می‌گیرند (شکل ۹ ب) [۲۲،۲۱].

همچنین در نمودار Hf/3-Th-Ta [۲۳] (شکل۱۰ الف) نمونه-های مورد بررسی منطقه‌ی مورد بررسی در گستره‌ی انواع آهکی-قلیایی قوس آتشفشانی قرار می‌گیرند. در نمودار Ti-Zr-Y [۲۴] (شکل۱۰ ب) نمونه‌های منطقه در گستره‌ی C قرار گرفته و به بازالت‌های آهکی-قلیایی نواحی فعال حاشیه‌ی قاره متمایل هستند. با توجه به (شکل۱۰ پ) به نظر می‌رسد که کمان ماگمایی سازنده‌ی سنگ‌های منطقه‌ی ناشی از فرورانش یک پوسته‌ی اقیانوسی به زیر یک پوسته‌ی قاره ای بوده است.

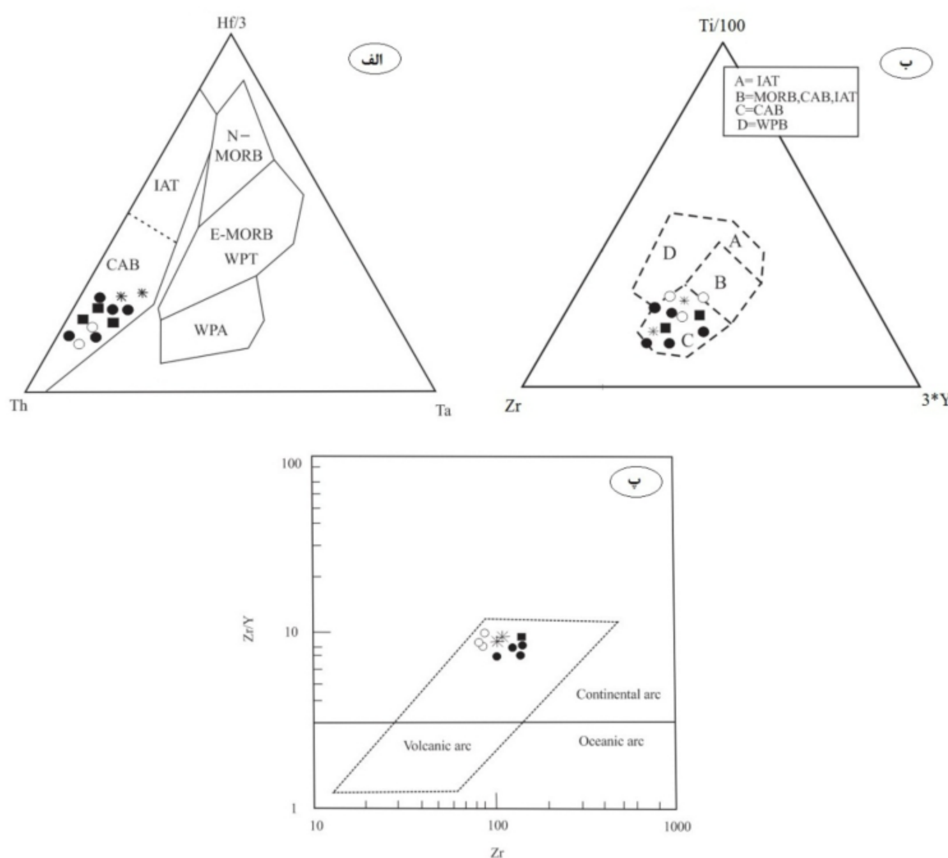
از نسبت عناصر کمیاب Zr/Y نیز می‌توان برای تشخیص محیط زمین‌ساختی بهره برد. به این صورت که اگر در گدازه‌ها نسبت Zr/Y بزرگتر از ۳ باشد به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای وابسته‌اند و اگر در آنها این نسبت کمتر از ۳ باشد به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی تعلق دارند. سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی دارای نسبت Zr/Y بالاتر از ۳ هستند (میانگین ۱۰) و در گروه قوس‌های آتشفشانی قاره‌ای قرار می‌گیرند [۲۵].



شکل ۸ نمودار عنکبوتی عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت [۱۹] برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی شمال شرق بافت (علائم مشابه شکل ۴).



شکل ۹ الف) موقعیت زمین ساختی گدازهای منطقه‌ی مورد نظر با استفاده از نمودار تغییرات TiO_2 نسبت به Al_2O_3 [۲۱]، ب) تعیین موقعیت زمین ساختی نمونه‌های مورد بررسی. منطبق بر نمودار Ti در برابر Zr [۲۲] منطبق بر این نمودار نمونه‌های منطقه مورد بررسی به کمان‌های آتشفشانی وابسته‌اند (علائم مشابه شکل ۴).



شکل ۱۰ الف) موقعیت زمین‌ساختی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی شمال شرق بافت با بهره‌گیری از مثلث Hf-Th-Ta [۲۳]، ب) نمودارمثلثی Ti-Zr-Y [۲۴] که مبین وابستگی سنگ‌های مورد بررسی به گستره‌ی سنگ‌های جزایر قوسی در حاشیه‌ی فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند، پ) نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی بر روی نمودار Zr/Y-Zr [۲۵] که وابستگی این سنگ‌ها را به نواحی کمان‌های قاره‌ای آتشفشانی نشان می‌دهد (علائم مشابه شکل۴).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

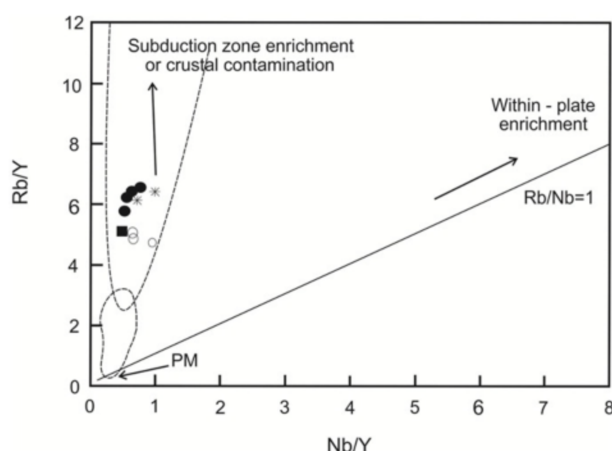
با توجه به نسبت های بالای Nb/U در منطقه‌ی (۵-۲٫۶۳) و Nb/Th (۰٫۶۸-۱٫۲) در سنگ‌های منطقه و نزدیک بودن این اعداد به مقادیر گزارش شده به کمان‌های آتشفشانی (۱۱-۱٫۶ و ۵٫۲-۰٫۳۶)، می‌توان گفت که ماگمای این سنگ‌ها شباهت زیادی به ماگماهای کمان آتشفشانی همراه با مقادیر بالایی از این نسبت‌ها دارد [۲۶]. علاوه بر این عقیده [۲۷] نسبت بالای Ba/Nb معرف ماگماتیسم کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای است، که برای نمونه‌های مورد بررسی در شمال شرق بافت میانگین ۸۰ است. به نظر [۲۸] می‌توان ماگمای کمان آتشفشانی را بر حسب نسبت Ce/Yb به دو نوع غنی شده و اندکی غنی شده تقسیم کرد. اگر نسبت فوق بالاتر از ۱۵ باشد نشانگر کمان غنی شده و اگر کمتر از ۱۵ باشد معرف کمان کمی غنی شده است. به علاوه در ماگماهای کمی غنی شده این تغییرات دو عنصر با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارد، در صورتی که در انواع قوس‌های غنی شده این نسبت‌ها نشانگر نسبت این عناصر در خاستگاه، میزان درجه‌ی ذوب بخشی و دخالت رسوب‌های فرورونده در تولید گدازه است. میانگین این نسبت در سنگ‌های شمال شرق بافت ۴۰ است که معرف همخوان آن با یک ماگمای کمان غنی شده است. این غنی‌شدگی می‌تواند ناشی از دگرنهادی شدید منبع گوشته‌ای و نرخ پایین ذوب بخشی خاستگاه باشد. همچنین سنگ‌های آذرین با نسبت پایین TiO_2 و غنی شدگی از عناصر LIL (شبیه نمونه‌های این بررسی) حاکی از دخالت رسوب‌های در یک خاستگاه ماگمایی دارند [۲۹] حال آنکه سنگ‌های آذرین غنی از تیتانیوم و نسبت های اندک Rb/Sr درون یک شکافت درون صفحه‌ای تشکیل شده‌اند. بر اساس نسبت Zr/Nb می‌توان مناطق وابسته به فرورانش کوهزایی را از انواع غیر کوهزایی تمیز داد. به این ترتیب که اگر نسبت Zr/Nb در سنگ‌های مورد بررسی از ۱۰ بزرگتر باشد نشان-دهنده ماگماتیسم وابسته به یک خاستگاه تغییر یافته متناسب با فرورانش، و اگر این نسبت کمتر از ۱۰ باشد نشانگر یک خاستگاه غیرکوهزایی است [۲۶]. میانگین این نسبت در سنگ‌های منطقه ۳۲ است که نشاندهنده‌ی ارتباط سنگ‌های منطقه با محیط فرورانش است. یک روش مناسب دیگر برای تشخیص سنگ‌های آتشفشانی کوهزایی و غیرکوهزایی، استفاده از نسبت Al_2O_3/Fe_2O_3 است به طوریکه اگر این نسبت کمتر از ۲ باشد وابسته به انواع ناکوهزایی خواهند بود و نسبت‌های بزرگتر از ۲ به انواع کوهزایی. در سنگ‌های مورد بررسی، این نسبت بین ۱٫۶۵ و۵٫۶۱ تغییر می‌کند و به گروه انواع کوهزایی تعلق دارند. آندزیت‌های کوهزایی و سنگ‌های وابسته به آن‌ها بیشتر در دو محیط حاشیه‌ی فعال قاره و جزایر قوسی تشکیل می‌شوند که هر یک سرشتی‌های خاص خود را دارند. در جدول ۲ مقایسه‌ای میان سرشتی‌های انواع سنگ‌های آتشفشانی جزایر قوسی و حاشیه‌ی فعال قاره‌ای با سنگ‌های شمال شرق بافت و سنگ‌های آتشفشانی شمال بیرجند، تفتان و آندزیت-های شمال غرب ایران صورت گرفته است.

تعدادی از پژوهشگران [۲۹، ۳۰، ۳۱] سنگ‌های آتشفشانی واقع در کمربند ارومیه-دختر را در ردیف انواع کمان‌های ماگمایی نابالغ و جوان قلمداد می‌کنند و منطقه مورد مطالعه هم به احتمال زیاد در چنین محیطی شکل گرفته است. برای بررسی شکل‌گیری ماگمایی سنگ‌های مورد مطالعه از مدل-سازی‌های گوناگون کمک گرفته شده است. یکی از این شبیه سازی‌ها در نمودار Rb/Y-Nb/Y (شکل ۱۱) آمده است [۳۲]. روندهای عمودی داده‌ها در این نمودار می‌تواند غنی شدگی منطقه فرورانش یا آلودگی پوسته‌ای را نشان دهد در حالی که غنی‌شدگی درون صفحه‌ای باعث به وجود آمدن نسبت‌های Nb/Rb مساوی یک می‌شود [۳۳]. در این نمودار نمونه‌های مورد بررسی به صورت عمودی آرایش یافته‌اند که می‌تواند نشانگر غنی‌شدگی منطقه‌ی فرورانش یا آلودگی پوسته‌ای این نمونه‌ها باشد. در نمونه‌های آندزیتی منطقه، نسبت Nb/Y پایین بوده (میانگین ۰٫۲۹) و نشاندهنده‌ی تهی‌شدگی HFSE در این سنگ‌هاست. این حالت در اغلب سنگ‌های آتشفشانی وابسته به منطقه فرورانشی مشاهده شده است [۳۴]. در منطقه‌ی فرورانشی HFSE ها مانند Nb و Ti درون صفحه فرورونده باقی می‌مانند در حالی که عناصر LILE ها مثل Ba، K و Sr به راحتی به درون گوه‌ی گوشته‌ای بالای صفحه فرورنده منتقل می‌شوند [۳۵،۳۴]. مقایسه‌ی فراوانی عناصر خاکی نادر در گدازه‌های آتشفشانی منطقه با انواع شناخته شده‌ی آندزیت‌های جهان نشان می‌دهد که الگوی داده‌های عناصر خاکی نادر وابسته به گدازه‌های منطقه‌ی شمال شرق بافت، تشابه بالایی با روند عناصر خاکی نادر CAB (بازالت‌های آهکی-قلیایی شاخص نواحی قوس آتشفشانی) (شکل ۱۲) دارد، ولی این نمونه‌ها نسبت به LKT (تولئیت‌های کم پتاسیم فقیر از عناصر ناسازگار) از LREE ها بسیار غنی‌تر بوده و حاوی مقادیر کمتری از HREE هستند.

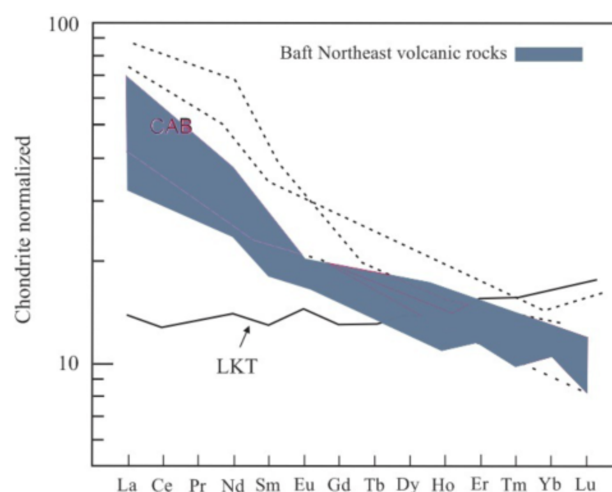
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

جدول ۲ مقایسه‌ی داده‌های شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی در محیط ناکوهزایی (جزایر قوسی) و کوهزایی (حاشیه‌ی قاره‌ای فعال) [۳۶] با آتشفشانی‌های بافت، بیرجند [۳۷]، تفتان [۳۸] و شمال غرب ایران [۳۹].

شاخص	جزایر قوسی	حواشی فعال قاره	تفتان	شمال بیرجند	شمال شرق بافت	شمال غرب ایران
SiO_2	۶۶-۵۰	۷۵-۵۶	۶۰٫۲- ۵۷	۷۰-۵۵	۶۷-۴۸	۵۶-۵۳
Al_2O_3/Fe_2O_3	۲<	۲<	۳٫۹۱-۲٫۶۲	۷٫۶۲-۲٫۶	۵٫۶۱-۱٫۶۵	۳٫۵-۳
FeO/MgO	۲>	۲<	۴٫۱۶-۱٫۶۷	۱۲٫۶-۱٫۳	۳-۱٫۸۱	۳-۲٫۱۷
K_2O/Na_2O	۰٫۸	۰٫۶- ۱٫۱	۰٫۷۷- ۰٫۴۷	۰٫۸-۰٫۴	۰٫۵	۱٫۲
Rb (ppm)	۴۵-۳۰	۱۰۸-۶۶	۳۴۰-۵۵	۲۴۵-۴۴	۵۷-۰٫۴	۱۵۸-۶۸
Zr (ppm)	۱۱۲-۱۰۰	۲۲۶-۱۸۴	۴۱۰-۹۵	۱۲۳-۲۳	۱۱۶-۲۸	۲۲۲-۱۳۱
Sr (ppm)	۴۶۰-۲۸۰	۸۶۰-۵۷۰	۷۶۳-۳۱۰	۱۱۴۸-۲۱۸	۶۵۲-۲۹۷	۸۳۳-۵۵۳
لیتولوژی	بازالت، آندزیت، داسیت	آندزیت، ایگنمبریت، آذرآواری	بازالت، آندزیت بازالت، آندزیت	داسیت،آندزیت، ریولیت و به ندرت آذرآواری	آندزیت، آندزیتبازالت، داسیت، اندک بازالت و ریولیت	آندزیت، تراکی‌آندزیت، توف
سری ماگمایی	بیشتر تولهایتی و به مقدار کمتر آهکی-قلیایی	بیشتر آهکی-قلیایی، و به مقدار کمتر تولهایتی	تماما آهکی-قلیایی و ندرتا آهکی	تماما آهکی-قلیایی	تماما کالک‌آلکالن و به ندرت تولهایتی	شوشونیتی



شکل ۱۱ نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Y [۳۲] سنگ‌های منطقه مورد بررسی مشخص شده است که روند غالب در آنها به سمت غنی‌شدگی در منطقه‌ی فرورانشی و آلایش پوسته‌ای است (علائم مشابه شکل ۴).



شکل ۱۲ روند عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت نمونه‌های شمال شرق بافت در مقایسه با تولئیت‌های فقیر از پتاسیم (LKT) و بازالت‌های آهکی قلیایی مناطق قوس آتشفشانی (CAB) (داده های CAB و LKT از [۲۳]).

بنابر نمودارهای بهنجار شده‌ی نمونه‌های آتشفشانی شمال شرق منطقه‌ی بافت که نسبت به کندریت [۱۹] و گوشته‌ی اولیه [۱۸] بهنجار شده‌اند غنی شدگی از Th در این سنگ‌ها مشخص شده است. مقادیر بالای توریوم در این سنگ‌ها نقش رسوب‌های فرورانده شده طی فرورانش و مشارکت آن با ماگمای تولیدکننده‌ی سنگ‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد (شکل ۱۳) [۴۱،۴۰]. افزایش توریم را می‌توان در این سنگ‌ها به ۲ عامل نسبت داد:

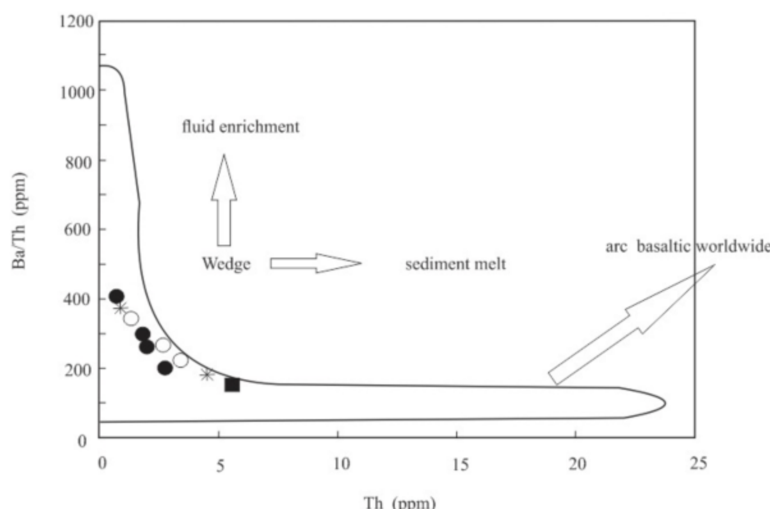
۱- تاثیر آلودگی ناشی از مواد پوسته‌ی فوقانی

۲- تاثیر آبگون‌های آزاد شده از پوسته‌ی اقیانوسی فرورونده.

به طور کلی ماگماهای حواشی فعال قاره‌ای در مقایسه با ماگماهای جزایر قوسی درجات بالاتری از غنی شدگی عناصر ناسازگار را نشان می‌دهند که ممکن است نشان‌دهنده‌ی یک خاستگاه غنی شده و رخداد آلایش پوسته‌ای باشد [۴۰].

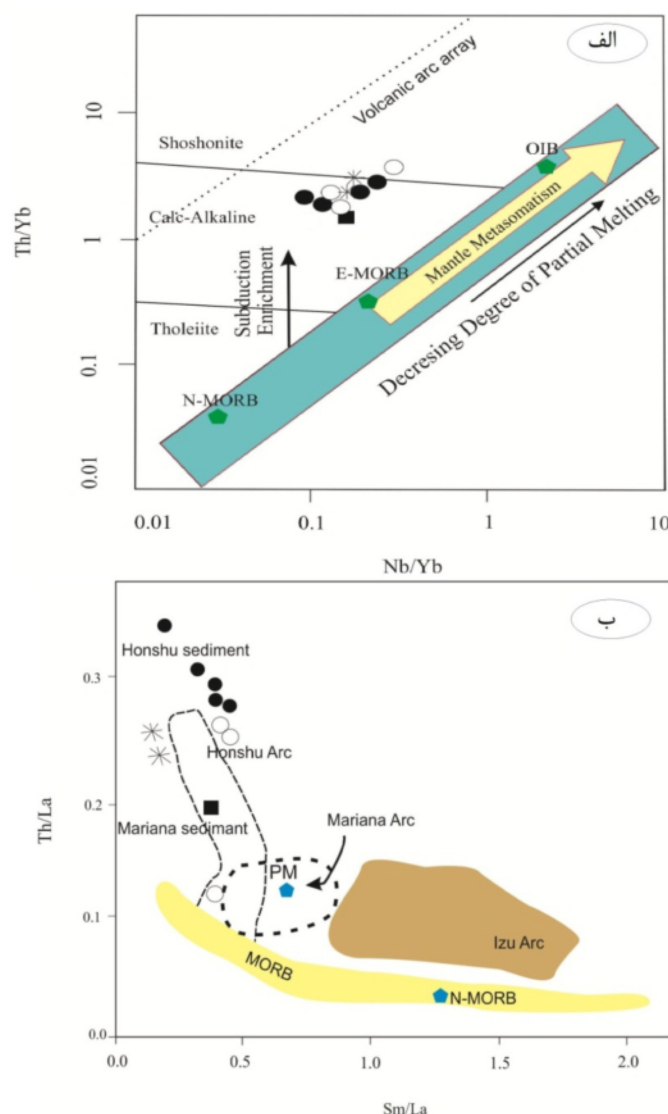
بحث و برداشت

به طور کلی نسبت‌های Th/Y نسبت به Nb/Y و Th/Yb، می‌توانند اطلاعات جامعی از خاستگاه آتشفشانی‌های منطقه‌ی مورد بررسی فراهم کنند. غنی شدگی گوشته‌ای با افزوده شدن مقدار کمی از گدازه‌ای که در اعماق، با درصد پایین ذوب بخشی ایجاد شده‌اند، صورت گیرند که همراه با افزایش نسبت‌های Th/Y، Nb/Y و یا Th/Yb یا Nb/Yb باشد. اما از طرف دیگر غنی‌شدگی ناشی از شاره‌های منطقه‌ی فرورانش تنها به افزایش نسبت‌های Th/Y و Th/Yb به همراه کاهش نسبت Nb/Y صورت می‌گیرد. چنانکه در شکل (۱۴ الف) دیده می‌شود، روند غنی‌شدگی واحدهای آتشفشانی منطقه همخوان با روند غنی شدگی همراه با منطقه‌ی فرورانش است. علاوه بر این سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی با یک روند افزایشی در نسبت Th/Yb و نسبت Nb/Yb مشخص می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تفاوت عملکرد نقش جدایش بلورین و یا غنی‌شدگی با درجات مختلف خاستگاه گوشته‌ای است. نسبت Nb/Y سنگ‌های منطقه‌ی مورد بررسی بین ۰/۰۴ و ۰/۸ است. به طور کلی نقش خاستگاه استنوسفری یعنی یک خاستگاه غنی شده در مقابل خاستگاه لیتوسفری با نسبت Nb/Y بزرگتر از ۲ مشخص شده است [۴۲]. از طرف دیگر برای پی بردن به نقش رسوب‌ها در محل خاستگاه گوشته‌ای سازنده‌ی سنگ‌های آتشفشانی و پی بردن به نقش ذوب بخشی گوه‌ی گوشته‌ای به تنهایی و یا همراه با رسوب‌های فرورانش شده در تشکیل گدازه‌های بازالتی نمودار Sm/La در برابر Th/La پیشنهاد شده است [۴۳]. به طور کلی نسبت Th/La در بازالت‌های اقیانوسی پایین بوده (کمتر از ۰/۲)، در حالی که در محیط‌های قاره‌ای این نسبت بالاست (بالاتر از ۰/۲۵)، و در بازالت‌های قوس‌های آتشفشانی و رسوب‌های این میزان بین ۰/۰۹ و ۰/۴۰ متغیر است. سنگ‌های منطقه مورد بررسی روندی خطی را بین ترکیب رسوب‌های کمان و ترکیب گوشته را در نمودار (شکل ۱۴ ب) نشان می‌دهند. لذا ماگماهای کمان آتشفشانی سهم زیادی از نسبت Th/La خود را از رسوب‌ها به ارث می‌برند و این نسبت در گوه‌ی گوشته‌ای و طی فرایند فرورانش به تنهایی و بدون دخالت رسوب‌ها نمی‌تواند مقادیر جدا شده‌ی بالا را نشان دهد.



شکل ۱۳ موقعیت نمونه‌های مورد بررسی روی نمودار Ba/Th در برابر Th [۴۰] (علائم مشابه شکل ۴).

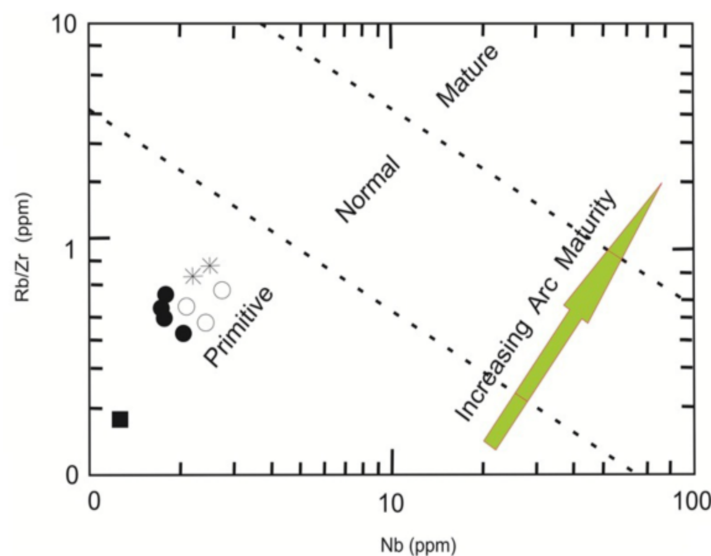
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]



شکل ۱۴ الف) نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb برای سنگ‌های مورد بررسی [۴۲]، ب) نمودار Sm/La در برابر Th/La برای بازالت‌های قوس‌های آتشفشانی و سنگ‌های منطقه‌ی مورد بررسی [۴۳]. هر قوس آتشفشانی روندی اختلاطی میان ترکیب گوشته‌ای و یک ترکیب رسوبی را نشان می‌دهد.

نسبت Th/La برای بیشتر گدازه‌های منطقه‌ی شمال شرق بافت بین ۰٫۱ تا ۰٫۳۷ متغیر است و بیشتر نمونه‌های مورد بررسی به قوس آتشفشانی Honshu تمایل دارند که معادل روند اختلاط میان یک مولفه‌ی گوشته‌ای و رسوب‌هاست. بنابراین آنچه که این شکل نشان می‌دهد تأثیر رسوب‌های فرورانده شده در خاستگاه سنگ‌های منطقه‌ی مورد بررسی شامل تناوبی از گدازه‌ها و مواد آذرآواری بوده و گدازه‌ها بیشتر از نوع آندزیت، آندزیت بازالت و داسیت هستند. گدازه‌های مورد نظر از درشت بلورها غنی بوده و پلاژیوکلاز در آنها فراوان است. در مقطع نازک، آثار عدم تعادل در کانی‌هایی نظیر پلاژیوکلاز دیده شده و احتمال آمیختگی ماگماهایی با ترکیب تقریباً مشابه در سنگ‌ها وجود دارد [۱۲]. از نظر شیمیایی سنگ‌ها به انواع وابسته به بازالت‌های آهکی-قلیایی مناطق فرورانشی شبیه‌اند و منطبق بر نمودارهای عناصر نادر از قبیل Nb نسبت به Rb/Zr (شکل ۱۵) جزء سنگ‌هایی هستند که در کمان‌های ماگمایی جوان و نابالغ تشکیل شده‌اند. همچنین ماگماهای سازنده این سنگ‌ها آثار آلودگی یا ورود مواد پوسته‌ای از لیتوسفر فرورو را نشان داده و می‌توانند حاصل ذوب بخشی یک گوشته‌ی دگرنهاد شده باشند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]



شکل ۱۵ نمودار جدایش محیط زمین‌ساختی برون [۴۴] که در آن از نسبت Rb/Zr در برابر Nb استفاده شده است و نشان‌دهنده‌ی وابستگی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد بررسی به کمان‌های آتشفشانی نابالغ و تکامل نیافته است (علائم مشابه شکل ۴).

تحرک عناصر کمیاب ناسازگار هنگام آب‌زدایی لیتوسفر اقیانوسی فرورونده فرآیندی است که احتمالا در تشکیل ماگماهای آهکی-قلیایی موثر است و پژوهشگران و زمین شناسان متعددی بر این باورند که طی این شرایط عناصری مانند Sr، K، Rb و Ce می‌توانند همراه با شاره‌ها حرکت کرده و به سمت گوه‌ی گوشته‌ای صعود کنند و سبب دگرنهادی آن شوند [۳۵]. هر چند که در ماگماهای آندزیتی و بازالتی عناصر خاکی نادر در کانی‌های اولیه ناسازگار بوده و مقدارشان در گدازه بالاتر از کندریت است، ولی افزایش مقدار عناصر LREE نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین می‌تواند به علت تبلور پیروکسن و الیوین باشد چراکه ضریب توزیع REE در این کانی‌ها از La تا Lu افزایش می‌یابد و تبلور جدایشی این کانی‌ها می‌تواند گدازه‌ی باقیمانده را از LREE نسبت به HREE غنی سازد [۳۴]. آندزیت‌های آهکی-قلیایی نسبت به انواع سنگ‌های پشته‌ی میان اقیانوسی از عناصری که پتانسیل یونی پایینی دارند (Sr، K، Rb و Ba) غنی تر بوده و از عناصر با پتانسیل یونی بالا (مثل Ta، Nb، Ce، Hf، Y، Yb و Sc) تهی‌ترند. غنی‌شدگی این سنگ‌ها از LREEها به دگرنهادی منشأ گوشته‌ای آنها به‌وسیله‌ی شاره‌های آزاد شده از لیتوسفر فرورو، نسبت داده می‌شود. در مقابل پایین بودن فراوانی عناصر HFS را می‌توان به درجات بالاتر ذوب بخشی و پایداری این عناصر در فازهای دیرگداز ورقه فرورونده نسبت داد [۳۴]. به این ترتیب یک خاستگاه گوه‌ی گوشته‌ای دگرنهاد بالای منطقه‌ی فرورانش برای سنگ‌های منطقه، منطقی به نظر می‌رسد. بر اساس نمودار [۴۴] (شکل ۱۵) که در آن از نسبت لگاریتمی Rb/Zr نسبت به Nb استفاده شده است، غالب سنگ‌های منطقه در گستره‌ی کمان‌های ماگمایی جوان و نابالغ و یا در مراحل اولیه‌ی تکامل و گسترش کمان ماگمایی قرار گرفته اند. بررسی‌های مشابه صورت گرفته در ایران مانند شهاب‌پور [۳۱] نیز تایید کننده‌ی این برداشت است. بنابراین کم بودن ضخامت پوسته‌ی ایران مرکزی هنگام فرورانش (حدود ۳۵ کیلومتر) می‌تواند نقش اصلی را در وابستگی این سنگ‌ها با جزایر قوسی داشته باشد [۴۰]. بنابر بررسی‌های [۴۵]، عمق موهو در حال حاضر حدود ۴۰ کیلومتر است که در زمان ائوسن کمتر از این مقدار بوده است زیرا برخورد صفحه‌ی عربستان با ایران و غلبه‌ی رژیم فشارشی منجر به تغییر عمق موهو و بیشتر شدن ضخامت آن از ائوسن شده است. علی رغم همخوانی کمان‌های ماگمایی در چگونگی فوران ماگما، تفاوت‌های مهمی بین فرورانش به زیر پوسته‌ی اقیانوسی و فرورانش به زیر پوسته‌ی قاره‌ای وجود دارد. کمان‌های آتشفشانی که روی پوسته‌ی ضخیم فوران می‌کنند ماهیت ویژه‌ی خود را دارند مثلاً بیشتر سیلیسی بوده و به ازای مقدار معلوم SiO_2 تحول یافته‌تر می‌شوند. و نیز از عناصر LILE بویژه روبیدیوم، پتاسیم و اورانیوم غنی‌ترند. ماگما در حواشی فعال قاره‌ای بیشتر ترکیب آندزیتی – داسیتی داشته و پتاسیم بالایی دارد ولی ماگماهای جزایر قوسی بیشتر ترکیب آندزیت بازالتی دارند

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

و مقدار K_2O آنها پایین تا متوسط است [۴۶]. در جدول ۲ مقایسه‌ای میان سرشتی‌های انواع سنگ‌های آتشفشانی وابسته به محیطهای کوهزایی جزایر قوسی و حاشیه‌ی فعال قاره‌ای با سنگ‌های شمال شرق بافت و سنگ‌های آتشفشانی شمال بیرجند، آتشفشانهای تفتان و آندزیت‌های شمال غرب ایران برای شناخت تفاوت‌های کلی میان آن‌ها صورت گرفته است.

برداشت

بنابر شواهد متعدد به دست آمده، معلوم شد که گدازه‌های منطقه‌ی شمال شرق شهرستان بافت و شمال غرب شهرستان رابر محصول جدایش ماگماهایی هستد که در آغاز از ذوب بخشی یک گوشته‌ی دگرنهاد در بخش بالایی منطقه‌ی فرورانشی ایجاد شده‌اند. گوشته‌ی خاستگاه رشته‌های سنگی منطقه به احتمال زیاد یک گوشته‌ی غنی‌شده بوده است. الگوی نمودارهای عنکبوتی نشانگر غنی‌شدگی این سنگ‌ها از عناصر LIL و LREE و تهی‌شدگی از عناصر HFS است. این الگو شاخص کمان‌های ماگمایی ناشی از فرورانش است. ژئوشیمی سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی در منطقه که طیف غالب واحدهای سنگی را به خود اختصاص داده است بیانگر شرایط تشکیل سنگ‌های مورد بررسی در یک جایگاه کمان آتشفشانی وابسته به حاشیه قاره‌ای فعال و حاکی از فوران این گدازه‌ها در یک کمان ماگمایی نابالغ است. ماگماهای مورد نظر حین صعود، در بخش‌هایی از پوسته توقف داشته و در اتاق ماگمایی ضمن تبلور کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز پیوسته مورد هجوم ماگماهای اولیه و اصیل‌تر قرار گرفته‌اند. تبلور جدایشی و آلودگی پوسته‌ای در ترکیب شیمیایی این سنگ‌ها قابل ملاحظه است.

مراجع

[1] Berberian F., *"Petrogenesis of Iranian plutons: a study of the Natanz and Bazeman intrusive Complex*", Ph.D Thesis. University of Cambridge, (1981) 300pp.

[2] Jung D., Kursten M.O., Turkian M., *"Post-Mesozoic volcansim in Iran and its relation to the subduction of the Afro- Arabian under the Eurasion plate. Impilger & Rosler (Eds), After between continental and oceanic rifting.PP. 182-190. Intenational symposium on the Afra Region and Related Rift problems"*, Bad Bergzaben, (1975) Vol.2.

[3] Dimitrijevic M. D., *"Geology of Kerman Region"*, Geol. Sur. Iran, Yu. No.52 (1973).

[4] Dimitrijevic, M. D., Cvetic, S., and Djokovic, I., *"Geology of Kerman region: institute for geological and mining exploration and institution of nuclear and other mineral raw materials, Scale: 1: 500000"*, Geological survey of Iran, Report Yu/52, 334 pp.1973.

[۵] احمدی مقدم، پ.، احمدی پور، ح.، *"ژئوشیمی و پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی کوه چهلتن، جنوب غرب بردسیر"* مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۹۳) ، صفحه ۳۷ -۴۸

[۶] فاتحی ح.، مرادیان ع.، احمدی پور ح.، *"ژئوشیمی، سنگ نگاری و خاستگاه زمین ساختی سنگ های آتشفشانی ائوسن دره زارچوئیه (جنوب شرق بردسیر)"*، مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۹۱) ، صفحه ۵۱۵ -۵۳۲

[۷] آقانباتی ع.، *"زمین شناسی ایران"*، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۵۸۶ صفحه . ۱۳۸۳

[8] Dimitrijevic M. D., Srdic A., Dimitrijevic M. N., *"Geological map of Iran 1:100000 series Sheet 7348- Baft."*, *Geological survey of Iran*. 1959.

[۹] درویش زاده ع، *"زمین‌شناسی ایران"*، انتشارات دانش امروز، ۹۰۰ صفحه، ۱۳۷۰

[۱۰] معین وزیری ح، *"دیباچه‌ای بر ماگماتیسم در ایران"*، انتشارات دانشگاه تربیت معلم تهران، ۴۴۰ صفحه، ۱۳۷۵

[11] Eichelberger J. C., *"Andesitic volcanism and crustal evolution. In: Izbekov. P.E., Eichelberger. J.C., Patino. L.C., Vogel. T.A., Iranov. B.V., 2002. Calcic cores of plagioclase phenocrysts in andesite from Karymsky volcano"*, Evidence for rapid introduction by basaltic replenishment. Geological society of America. v. 30; no. 9; p. 799-802

[12] Davidson J., Tepley F., III Palacz Z., Meffan-Main S., *"Magma recharge, contamination and residence times revealed by in situ laser ablation isotopic analysis of feldspar in volcanic rocks. In: Izbekov, P.E., Eichelberger, J.C., Patino, L.C., Vogel, T.A., Iranov, B.V., 2002. Calcic cores of Plagioclase phenocrysts in andesite from Karymsky volcano"*, Evidence for rapid introduction by basaltic replenishment. Geological society of America. v. 30; no. 9; p. 799-802.

[13] Singer B. S., Dungan M. A., Layne G. D., *"Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: Clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. In: Izbekov. P.E., Eichelberger. J.C., Patino. L.C., Vogel. T.A., Iranov. B.V., 2002. Calcic cores of plagioclase phenocrysts in andesite from Karymsky volcano"*, Evidence for rapid

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

[23] Wood D. A., *"The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province"*, Earth and Planetary Science Letters. 50 (1980) 11-30.

[24] Pearce J. A., Cann J. R., *"Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses"*. Earth and Planetary Science Letters. 19 (1973) 290-300.

[25] Pearce J.A., *"Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins"*, In Hawkes worth C.J. and Norry, M.J., shiva, Nantwich, (1983) 230-249.

[26] Sun S.S., McDonough W.F., "*Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle composition and processes*", In: A.D., Saunders, and A.M., Norry, (eds.), magmatism in ocean basins, Geol. Soc. London. Spec; (1989).Pub, 42, 313 – 345.

[27] Pearce J.A., Harris N. B. W., Tindle A.G., "*Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks*". Jour. Petrol, 25, 956 – 983; (1984).

[28] Pearce J. A., Norry M. J., *"Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rock. Contributions to Mineralogy and Petrology."*, Vol 69 (1979), Pp 33-47.

[29] Sommer C.A., Lima E.F., Nardi L.V.S., Liz J.D., Waichel. B.L., "*The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high- K tholeiitic and silica-saturated, sodic alkaline volcanism in post collisional basins*". Anais da Academic Brasileira de Ciencias 78, 573-589; (2006).

[۳۰] شهریاری ش.، قربانی م.، نصیری برنجانی ر.، *"ژئوشیمی و سنگ شناسی سنگ های آتشفشانی شمال شرق نراق: ماگماتیسم جزایر قوسی یا حواشی فعال قاره‌ای؟ "*، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۹۰) ص.۲۵۱-۲۶۲

[31] Shahabpour J., *"Island - arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt'*, Journal of Asian Earth Sciences. 30,(2007) 652-665.

[32] Chaffey D. J., Cliff R. A., Wilson B. M., *"Characterization of the st. Helena magma source"*, In: Temel. A., Gundogdu, A. Gourgaud. M.N., 1998. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 85 (1989) 327-354.

introduction by basaltic replenishment. Geological society of America. v. 30; no. 9; p. 799-802.

[14] Pearce J. A., *"A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Woman, D. A., (ed), Trace element geochemistry of volcanic rocks: Application for massive sulphide exploration"*, Geol. Assoc. Canada, short course notes. 12. 70-113.

[15] Peccerillo A., Taylor S. R., *"Geochemistry of Eocene Calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamoun area"*, northern Turkey. Contr. Mineralogy and Petrology. 58 (1976) 63-81.

[16] Temel A., Gundogdu M.N., Gourgaud A., *"Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya"*, Central Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 85, 327-354.

[17] Sun S. -s., Mc Donough W. F., *"Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Schmidt. M.E. & Grunder. A.L., 2011. Deep Mafic Roots to Arc Volcanoes: Mafic Recharge and Differentiation of Basaltic Andesite at North Sister Volcano, Oregon Cascades"*, Journal of Petrology. v. 0; n.0, (1989) 1-39.

[18] Wood D. A., *"The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic Classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province"*, Earth and Planetary Science Letters. 50 (1980) 11-30.

[19] Nicholson K. N., Black P. M., Hoskin P. W. O., Smith I. E. M., *"Silicic volcanism and back-arc extension related to migration of the Late Cainozoic Astralian-Pacific plate boundary. In: Asiabanha. A., Ghasemi. H. and Meshkin. M., 2009. Paleogene continental-arc type volcanism in NorthQazvin, North Iran"*, facies analysis and geochemistry. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung. v. 186/2; (2004) p. 201-214.

[20] Barley M.E., Brown S.J.A., Krapez B., Kositcin N., *"Physical Volcanology and geochemistry of a late Archaean volcanic arc: Kurnalpi and Gindalbie Terranes, Eastern Goldfields Superterrane"*, Western Australia. Precambrian Research. 161 (2008) 53-76.

[21] Muller D., Groves D. I., *"Pottasic igneous and associated gold-copper mineralization. Springer-Verlag"*, (1997) 241p.

[22] Perace J.A., "tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis". Earth planet Sci. Lett. 19 (1973) – 290-300

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.10.8]

[33] Edwards C., Menzies M., Thirlwall M., *"Evidence from Muriah, Indonesia, for the interplay of supra-subduction zone and intraplate processes in the genesis of potassic alkaline magmas. In: Temel. A., Gundogdu, A. Gourgaud. M.N., 1998. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research. 85 (1991) 327-354.

[34] Pearce J. A., *"Role of subcontinental lithosphere in magma genesis at active continental margins: in continental basalts and mantlexenoliths. In: Temel. A., Gundogdu, A. Gourgaud. M.N."*, 1998. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 85 (1983) 327-354

[35] Briqueu, et al?., *"In: Temel. A., Gundogdu, A. Gourgaud. M.N., 1998. Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya"*, Central Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 85 (1991) 327-354.

[36] Jakes P., White A. J. R., *"Hornblendes from calcalkaline volcanic rocks of island arcs and continental margins"*,Am. Mineral. 57(1972) 887 – 902.

[۳۷] یوسف زاده م.ح.، *"پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژنز سنگ-های آتشفشانی ترشیر منطقه بیرجند-خوسف"*، رساله دکتری پترولوژی، دانشگاه شهید بهشتی ایران (۱۳۸۶).

[۳۸] بیابان‌گرد ح.، مرادیان ع.، *"بررسی سنگ‌شناختی و ژئوشیمی کانی‌های اصلی سازنده سنگ‌های آتشفشانی تفتان"* مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۸۸)، ص ۲۰۲-۱۸۷.

[۳۹] کمالی ا.، عامری ع.، پیروج ه.، جهانگیری ا.، *" ژئوشیمی و سنگ‌شناسی تراکی‌آندزیت‌های منطقه اردها، شمال بزقوش، شمال غرب ایران"*، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران (۱۳۹۰)، ص ۳۲۴-۳۱۱.

[40] Hawkesworth C.J., Turner S., Peate D., McDermott F., Calsteren P.van., *"Elemental U and Th variations in island arc rocks: implications for U-series isotopes",* Chemical Geology 139 (1997) 207-221.

[41] Shahabpour J., *"Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt",* Journal of Asian Earth Sciences 30 (2007) 652-665.

[42] Pearce, J. A. and Cann, J. R. "Tectonic Setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis". Earth and Planetary Science Letter (1973), 19: 290-300.

[43] Plank T., *"Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents"*, Journal of Petrology (2005), 4: 1-24.

[44] Brown G.C., Thorpe R.S., Webb P.C., "*The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources",* Journal of Geological Society London 141 (1984) 413-426.

[45] Fernandez M., Ayala C., Skogseld J., Vergés J., Wheeler W., Karpuz R., *"Crustal and lithospheric structure in the Zagros folds and thrust belt: a geological and geophysical approach",* In: AAPG international conference & exhibition, Barcelona (2003).

[46] Stern R.J., *"Subduction zones",* Reviews of Geophysics 40, 4 (2002) 1-38.